

エリート駅伝選手を対象としたトレッドミル 漸増運動負荷試験のプロトコル開発

長浜尚史 松本晃裕 福田 平

Development of a Graded Exercise Testing Protocol Using a Treadmill in Elite *Ekiden* Runners

Hisashi Nagahama Akihiro Matsumoto Taira Fukuda

Abstract

The aim of this study was to develop and implement a graded exercise testing (GXT) protocol using a treadmill in elite *ekiden* runners, one that provides a constant rate of change in work rate, utilizing continuous changes in both speed and grade to reach the subjects' maximal effort in approximately 10 min. Thirteen male college *ekiden* runners (best race record of a 5000 m: 883.48 ± 12.19 s) completed a treadmill protocol that used a linear increase in treadmill grade with a curvilinear increase in running speed. By implementing the combination of increasing in grade and speed, oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) increased linearly ($r = 0.996 \pm 0.003$) with a slope of $5.58 \pm 0.64 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, but was higher than a predicted value. Time to reach the subjects' maximal effort was 9.59 min exclude warm-up time. Ventilatory threshold (VT) and respiratory compensated point (RCP) could be completely discriminated from gas exchange data obtained by GXT. This new treadmill protocol provides a linear increase in $\dot{V}O_2$ and is suitable for measuring the endurance ability in elite *ekiden* runners.

1. はじめに

駅伝競技は、1917年に京都から東京まで走った東海道駅伝徒歩競争が最初の大会とされる。世界的には Road Relay (IAAF, 2017) という名称が

使われ、マラソンと同距離の 42.195 km を複数の人数で走ることとしているが、陸上の他種目と比較してこの種目が普及しているとは言い難い。一方、日本では日本陸上競技連盟がその競技規則において、マラソンなどの道路競争と併せて駅伝競走規準を設け（日本陸上競技連盟, 2015）、状況に応じたコース設定で実施することが可能となっていることなどの理由から、今日では様々な競技者を対象とした大会が全国各地で開催されている。

男子大学生を対象とした駅伝競技大会としては、1970 年から始まった全日本大学駅伝対抗選手権大会（全日本大学駅伝）と 1989 年から始まった出雲全日本大学選抜駅伝競走（出雲駅伝）、そして 1920 年から始まった東京箱根間往復大学駅伝競走（箱根駅伝）が大学三大駅伝として挙げられる。特に箱根駅伝は、関東地区の地方大会であるにもかかわらず、前述した 2 つの全国大会よりも知名度が高く、全国から箱根駅伝を走りたい者が関東地区の大学に集まり、当大会の出場を目標としている。

さて、大会や区間によって異なるものの駅伝大会で一人の選手が走行する距離は、前述した大学三大駅伝の場合、最短距離区間でも 6 km 弱の距離があり、また、箱根駅伝では全区間が 20 km を超える長距離走となることから、本競技選手に全身持久力が求められることは言うまでもない。全身持久力の指標としてこれまで最も利用されてきたものは最大酸素摂取量（maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$ ）だろう。山地（2001）によれば持久性スポーツ競技者の $\dot{V}O_{2max}$ は非常に高く、また、Larsen & Sheel（2015）によると、ケニア人ワールドクラスランナーの $\dot{V}O_{2max}$ は $80\sim 85\text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 程度を示すという。そして、これらの競技者のパフォーマンスと $\dot{V}O_{2max}$ との間には高い相関関係が見られる（山地, 2001）。その一方で、対象を特に高いパフォーマンスを保持した持久性スポーツ競技者に限定した場合、競技成績と $\dot{V}O_{2max}$ との間に有意な相関関係が認められず、換気閾値（ventilatory threshold: VT）や、呼吸代償点（respiratory compensated point: RCP）などの代謝性閾値を用いた方が競技力を反映するといった報告（Kumagai et al., 1982）や、運動の経済性を示す指標の一つであるラン

ニングエコノミー (running economy: RE) は $\dot{V}O_{2max}$ と比較して 10 km 走などの記録との相関が高く、全身持久性競技においてはエネルギーをいかに有効に利用するかが大切であるとの指摘もなされている (Conley & Krahenbuhl, 1980; Daniels, 1985; 山地, 1997)。

これらの指標は漸増運動負荷試験 (Graded Exercise Testing: GXT) を実施して呼気ガス分析を行うことによって判定するのだが、その際、ステージが変わるごとに負荷量が大きく変動する多段階負荷法に対して、負荷量が直線的に増加していくランプ負荷法 (Whipp et al., 1981) は、VT や RCP の判定を容易にされている。そして、ランプ負荷法は多段階負荷法よりも短時間に最大運動まで到達できることから、 $\dot{V}O_{2max}$ を測定する場合にも効果的な方法であると言われる (Sperlich et al., 2015)。そのことから、GXT に用いる負荷装置としては負荷量を調整しやすい電磁式自転車エルゴメータが採用されることが多い。その一方で、運動時における活動筋量の違いから、自転車エルゴメータによって得られた $\dot{V}O_{2max}$ はトレッドミルによるものより 10~20% 低値を示すことがわかっている (Myers et al., 1991)。さらに、測定に際しては運動の特異性も考慮しなければならない (Jacobs & Sjodin, 1985)。駅伝選手の場合、走運動に習熟しており、運動装置としてはトレッドミルを用いた方が自然であり、また彼らの能力を反映した結果を導き出せるものと思われる。

トレッドミルを利用した GXT はこれまで多様なプロトコルが開発、利用されているが、1 ステージを 2~3 分とする Bruce 法や Astrand 法では一定負荷中に定常状態が得られやすい反面、ステージを上げる際の負荷変動量が大きく、その際に呼気ガス諸指標が乱されることとなり、VT や RCP の検出力が低下したり誤診に繋がったりする場合もある。また、Balke 法や Wasserman 法は 1 分漸増とステージ間隔は短いものの、歩行運動を強いるため傾斜上昇度が大きく、走行を主運動としている駅伝競技選手には不適當である。そして、近年トレッドミルを利用したランプ負荷法も多く見られるようになってきた (山本, 1993; Porszasz et al., 2003; 熊本と佐

川, 2006; 高橋ら, 2008; Marsh, 2012; Itoh et al., 2013; Sperlich et al., 2015, Silva et al., 2018) のは、前述したランプ負荷特有の利点を考慮したためだろう。山本 (1993) は、志野ら (1983) が開発したトレッドミルの速度と傾斜を組み合わせた酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) の推定式をもとに、トレッドミルの負荷量を直線的に増加させるランプ負荷プロトコルを開発した。このプロトコルはできるだけ最大運動時まで歩行を遂行できるように開発されていることや、その結果として負荷開始後の傾斜上昇度が大きくなることから、熊本と佐川 (2006)、高橋ら (2008) は、この予測式をアレンジした新たなプロトコルの作成を試みている。しかし、熊本と佐川 (2006) のものは $\dot{V}O_{2max}$ 、VT、RCP とともに RE も同時に測定することとしたため、かなりの速度まで傾斜をつけずに負荷をかけており、安全性を確保するにはトレッドミルの仕様などの制約を受ける。高橋ら (2008) のプロトコルは、高度に鍛錬された者が対象ではなく、エリート駅伝競技選手の体力特性は反映できないと考えられる。その他の報告についても優れた全身持久力を有する者を対象としたトレッドミル用のランプ負荷プロトコルとはなっていない。

そこで本研究は、トレッドミルを用いてエリート駅伝選手の全身持久力の指標となる $\dot{V}O_{2max}$ 、VT ならびに RCP を容易に求めるための負荷変動量を少なくした GXT プロトコルを開発し、その精度を検証した。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は駅伝競技を専門とする健常な男子大学生 13 名 (年齢: 19.8 ± 0.8 歳、身長: 171.2 ± 4.9 cm、体重: 57.7 ± 5.0 kg、BMI: 19.6 ± 0.9 kg \cdot m $^{-2}$ 、体脂肪率: 10.3 ± 0.9 %、5000 m のベストタイム: 883.48 ± 12.19 秒 [範囲: 14'15"9~14'57"77]) とした。彼らは箱根駅伝の出場を目指し週 6 日、1 週間あたり 18 時間から 24 時間程度の練習をこなしており、また、練習が制限されるような身体症状は有していない。被験者には、本研究参加に際しヘルシン

キ宣言に基づき、本研究の目的、内容および危険性について口頭および書面で十分に説明し、研究参加への同意を文章により得た。なお、本研究は亜細亜大学の「人を対象とする研究倫理審査委員会」の承認を得て行った（承認番号第 2018-002）。

2.2 測定手順

被験者は、事前に指定された時間に実験室（室温：19.1±1.0℃、湿度：51.1±11.2 %）に来室後、問診により過去の既往・運動歴や当日の体調などが確認された。次に、血圧、酸素飽和度、脈拍数、体重、キャリパーによる上腕背部および肩甲骨下角部の皮脂厚を測定した。そして、5～10 分かけてストレッチングや柔軟体操を行った後、呼気ガス採取用マスク（Hans Rudolph 社製）と心拍数測定用胸部ベルト型電極（Polar 社製）を装着し、トレッドミル（ウェルロード 200E：TKK3089、竹井機器工業社製）により GXT を実施した。GXT 実施中は呼吸循環指標を確認するとともに、声かけならびに手で示す意思表示により被験者の安全確保に努めた。運動終了後は直ちに呼気ガス採取用マスクを取り外すとともに、4 分間低速度での歩行によりクーリングダウンを行った後、GXT を終了した。

2.3 測定方法と測定項目

被験者はトレッドミル上で 4 分間の立位安静を保った後、傾斜を 0% とし 7.1 km・h⁻¹ で 3 分間の走運動によるウォーミングアップを行った。そして、走行ベルトを停止させることなくトレッドミルの速度と傾斜を増加させ、被験者が疲労困憊に至った時点で運動を終了した。傾斜は 30 秒毎に 0.5% 増加させた。また、速度は以下の式をもとに算出し 30 秒毎に増加させた。まず、運動時の $\dot{V}O_2$ を山本（1993）が作成した推定式、すなわち、 $\dot{V}O_2$ (mL・kg⁻¹・min⁻¹) = 0.15S² + 0.14SG + 0.45S + 0.40G + 4.23（S は速度 [km・h⁻¹]、G は傾斜 [%]）

によって予測した。この式を用いて傾斜を 0% としたウォーミングアップ

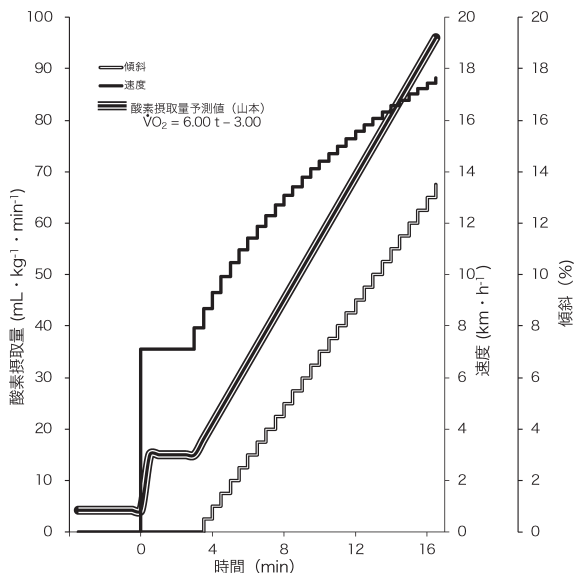


図1 エリート駅伝選手を対象としたトレッドミル漸増運動負荷試験のプロトコル

時の予測 $\dot{V}O_2$ が $15 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ となるように、また、漸増負荷開始後の予測 $\dot{V}O_2$ 漸増率を 30 秒で $3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (1 分毎に $6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) とすることで、漸増負荷開始から 10 分後の予測 $\dot{V}O_2$ が $75 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ となるように速度を設定し、エリート駅伝選手を対象としたトレッドミルを用いた GXT プロトコルを作成した (図1)。

呼気ガスは安静時から運動終了時まで継続的にポータブルガス分析器 (Metamax-3B, Cortex 社製) によってプレスバイプレス方式で測定した。ガス量とガス濃度については、測定前にメーカーのマニュアルに則り 2 L のシリンジおよび既知濃度ガスを用いて校正した。そして、 $\dot{V}O_2$ 、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$)、換気量 ($\dot{V}E$)、酸素に対する換気当量 ($\dot{V}E/\dot{V}O_2$)、二酸化炭素に対する換気当量 ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$)、呼気終末酸素分圧 (PET_{O_2})、呼気終末二酸化炭素分圧 (PET_{CO_2})、呼気ガス交換比 (RER) などの呼気ガス諸指標を求めた。心拍数 (HR) はテレメトリ方式により連続的に測

定し、ポータブルガス分析器によって得られたデータと同期させ、記録した。

$\dot{V}O_{2\max}$ は、負荷が増加しているにも関わらず $\dot{V}O_2$ のプラトーかレベルオフが確認された場合、もしくは $\dot{V}O_2$ の増加が $150 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ に満たない場合とした (Taylor et al., 1955)。最大心拍数 (maximal heart rate: HR_{\max}) は、運動負荷試験の最後の 30 秒間の平均値とした。

VT、RCP の決定は一般的に行われている V-Slope 法 (Beaver et al., 1986) を採用した。併せて、時間経過に伴う呼気ガス諸指標の変化をプロットしたグラフから、VT は $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ の増加を伴わない $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の増加する時点を、また、RCP は $PETCO_2$ が低下を開始し、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ と $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ の両者が増加する時点を判断材料として採用した (Davis, 1985)。これらの判定はこの作業に多くの経験を有している 2 名の運動生理学研究者によって実施された。

2.4 統計処理

エクセル 2016 (マイクロソフト社製) を用いて基本統計 (平均、標準偏差) を求めるとともに、統計解析ソフト SPSS Statistics Ver.25.0 (IBM 社製) を用いて直線回帰分析を行い、Pearson の積率相関係数を示すと共にその有意性を検定した。そして、5% 水準をもって統計的に有意であると判断した。

3. 結果

GXT 終了時間は 995.3 ± 18.2 秒、漸増負荷開始から 9 分 35 秒後となった。そして、 $\dot{V}O_{2\max}$ は絶対値と相対値でそれぞれ、 $4.47 \pm 0.36 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $77.6 \pm 3.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ を示した。また、 $\dot{V}E_{\max}$ 、 HR_{\max} はそれぞれ、 $130.8 \pm 12.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $184.5 \pm 7.7 \text{ bpm}$ を示した (表 1)。図 2 には、GXT 実施時にブレスバイブレスで測定した $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}O_2$ 、RER、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ 、 $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ 、 $PETCO_2$ 、 $PETO_2$ の一例を示した。9 呼吸で移動平均化したデータ

表 1 漸増運動負荷試験中に得られた酸素摂取量、換気量、心拍数

	安静時	ウォーミングアップ時	最大運動時
$\dot{V}O_2$ (L \cdot min $^{-1}$)	0.38 \pm 0.08	1.67 \pm 0.19	4.47 \pm 0.36
$\dot{V}O_2$ (mL \cdot kg $^{-1}$ \cdot min $^{-1}$)	6.7 \pm 1.2	29.0 \pm 3.3	77.6 \pm 3.3
$\dot{V}E$ (L \cdot min $^{-1}$)	12.0 \pm 3.2	41.0 \pm 6.0	130.8 \pm 12.8
HR (bpm)	66.3 \pm 8.5	108.1 \pm 11.5	184.5 \pm 7.7

$\dot{V}O_2$ は酸素摂取量、 $\dot{V}E$ は換気量、HR は心拍数を表している。値は平均 \pm SD で示している。

表 2 VT、RCP 時における酸素摂取量、最大酸素摂取量に対する割合、心拍数

	VT	RCP
$\dot{V}O_2$ (L \cdot min $^{-1}$)	3.77 \pm 0.40	4.09 \pm 0.35
$\dot{V}O_2$ (mL \cdot kg $^{-1}$ \cdot min $^{-1}$)	65.6 \pm 6.1	71.1 \pm 4.9
% $\dot{V}O_{2max}$ (%)	84.4 \pm 5.9	91.5 \pm 3.9
HR (bpm)	161.4 \pm 9.2	167.5 \pm 7.7

$\dot{V}O_2$ は酸素摂取量、% $\dot{V}O_{2max}$ は最大酸素摂取量に対する割合、HR は心拍数を表している。値は平均 \pm SD で示している。

は負荷量の増加とともに変動し、前述した方法により VT ならびに RCP が確認できた。他の被験者についても同様に VT、RCP を判定することができ、% $\dot{V}O_{2max}@VT$ ならびに % $\dot{V}O_{2max}@RCP$ はそれぞれ、84.4 \pm 5.9%、91.5 \pm 3.9% となり (表 2)、また、これら VT と RCP の決定率はいずれも 100% であった。

運動時間経過に伴う $\dot{V}O_2$ の増加を漸増運動開始 1 分後から運動終了直前 (11 分 30 秒) までの区間で被験者毎にプロットしたのが図 3 である。 $\dot{V}O_2$ は負荷量の増加とともに直線的に上昇しており、被験者個々について一次回帰した際の単回帰係数は 4.43 \sim 6.52、また、相関係数は 0.995 から 0.998 を示し、いずれの被験者についても統計的に有意な直線性が示された ($p < 0.001$)。そして、被験者全員の平均を一次回帰した結果、 $\dot{V}O_2 = 5.58t + 9.64$ (t : 運動開始後の時間 [分])、相関係数は $r = 0.97$ ($p < 0.001$) と統計的に有意な直線性が示された。

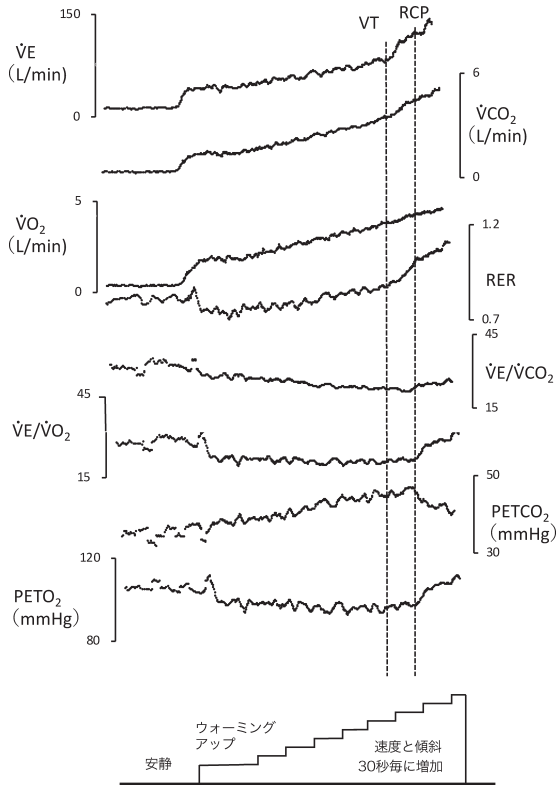


図2 漸増運動負荷試験中にブレスバイブレスで測定した呼吸ガス諸指標の変化

記号は以下の通り。 $\dot{V}E$ ：換気量， $\dot{V}CO_2$ ：二酸化炭素排出量， $\dot{V}O_2$ ：酸素摂取量，RER：呼吸ガス交換比， $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ：二酸化炭素に対する換気当量， $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ：酸素に対する換気当量， $PETCO_2$ ：呼気終末二酸化炭素分圧， $PETO_2$ ：呼気終末酸素分圧

GXT 実施時の $\dot{V}O_2$ 実測値は $\dot{V}O_2$ 予測値に対し、安静時には $6.7 \pm 1.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ と $4.2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、また、ウォーミングアップ時には $29.0 \pm 3.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ と $15.0 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ といずれの区間でも高値を示し、漸増運動負荷中においても相対的に高値を示した。そして、漸増負荷開始1分後から運動終了直前（運動開始後11分30秒）ま

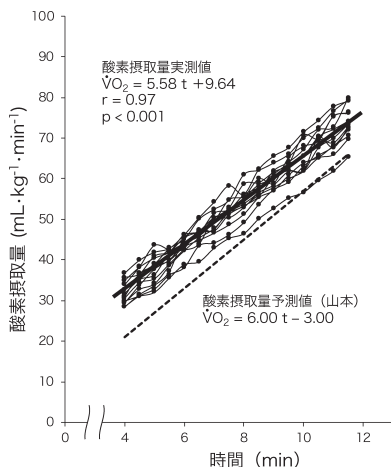


図3 対象者全員における運動開始4分後から運動終了直前までの酸素摂取量の経時変化

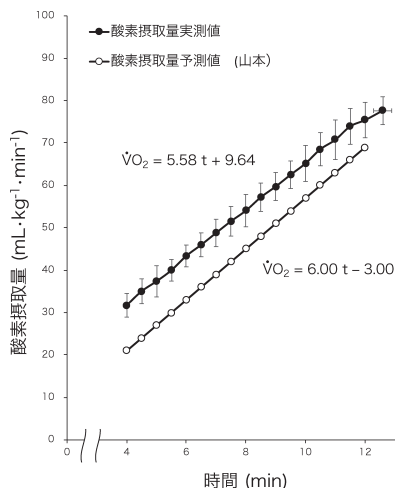


図4 運動開始4分後から最大運動時までの酸素摂取量の実測値と予測値（山本）の経時変化

酸素摂取量実測値は平均±SDで示した。酸素摂取量実測値の回帰式は、運動開始4分後から11分30秒後までの範囲で求めた。

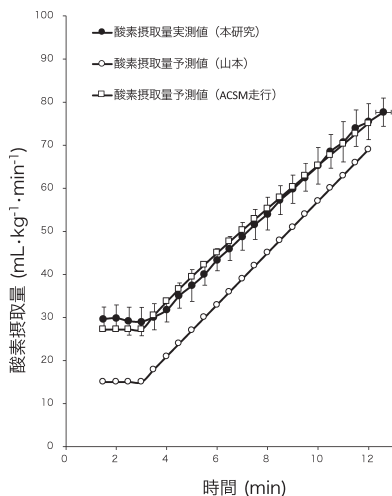


図5 漸増運動負荷試験中にみられた酸素摂取量の実測値、山本による予測値、ACSM（走行運動）による予測値の経時変化

酸素摂取量実測値は平均±SDで示した。

での区間を直線回帰したところ、 $\dot{V}O_2$ 実測値と予測値は以下に示す通りとなった (図4)。

$\dot{V}O_2$ 実測値: $\dot{V}O_2 = 5.58 t + 9.64$, t は時間 (分)

$\dot{V}O_2$ 予測値: $\dot{V}O_2 = 6.00 t - 3.00$, t は時間 (分)

4. 考察

本研究では、トレッドミルを用いてエリート駅伝選手の全身持久力の指標となる $\dot{V}O_{2max}$ 、VT ならびに RCP を容易に求めるための負荷変動量を少なくした GXT プロトコルを開発し、その精度を検証した。

GXT プロトコルを作成する場合、運動様式、運動負荷時間、漸増法について十分に考慮する必要がある (Beltz et al., 2016)。まず、負荷装置としては一般的に自転車エルゴメータかトレッドミルが用いられる。トレッドミルは転倒による危険性や運動負荷量が容易にコントロールできないというデメリットはあるものの、動員される活動筋量が多いので自転車エルゴメータと比較して $\dot{V}O_{2max}$ が 10~20% 高値を示す (Myers et al., 1991) ことや、エリート駅伝選手は走運動に慣れていることから、本研究ではトレッドミルを用いることとした。また、運動負荷時間の設定については、GXT により最大負荷まで運動を遂行させる場合にはウォーミングアップを除き 8~10 分程度で終了する負荷漸増法が好ましい (Buchfuhrer et al., 1983; Yoon et al., 2007) ことから、負荷開始 10 分前後で疲労困憊に至るように、そして、その際に得られる $\dot{V}O_{2max}$ 予測値が $75 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ となるようにした。駅伝競技は他の中長距離種目と同様に高度な全身持久力が求められるが、これまでの報告では中長距離を専門とするナショナルクラスの選手の $\dot{V}O_{2max}$ は $80 \sim 85 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ を示すという (山地, 2001; Larsen & Sheel, 2015)。本研究で対象とした被験者は日頃から激しいトレーニングをしている男子大学生エリート駅伝選手であるが、5000 m のベストタイムは日本記録 (13 分 8 秒 40, 2019/3/20 現在) や日本人学生記録 (13 分 19 秒 00, 2019/3/20 現在) と比較するとやや劣っているため、このよう

に設定した。

さて、本研究では人種差による影響を考慮して、日本人を対象とした山本（1993）の推定式をもとに、エリート駅伝選手を対象としたトレッドミルを用いたGXTプロトコルを作成した（図1）。今回、負荷の増加に伴う $\dot{V}O_2$ の直線性が確保されていたこと（ $\dot{V}O_2 = 5.58t + 9.64$, t は時間 [分], $r = 0.97$, $p < 0.001$ ）は、今回設定したGXTが $\dot{V}O_{2max}$ に加え、VT、RCPといった代謝性閾値も正確に求めることを可能にすること、および、本プロトコルの有効性を示している。一般に多段階漸増負荷法の場合、ステージが上がる際に呼気ガス諸指標が乱れる傾向にあり、その結果として代謝性閾値を判定することが難しい場合が生じる。そのため、負荷量の微調節が容易な電磁式自転車エルゴメータを用いて、直線的に負荷を増加させるランプ負荷法が開発され（Whipp et al., 1981）、それ以降様々な場面で活用されている。そして、近年ではこのランプ負荷法をトレッドミルに応用する試みもなされてきているが（Porszasz et al., 2003; 高橋ら, 2008; Silva et al., 2018）、これまでに報告された対象の多くは定期的に運動を実践していない一般人であり、本研究のように高度な全身持久力を保持した被験者の測定を想定したものはほとんどなかった。

例えば、Porszasz et al. (2003) は 30 秒毎にトレッドミルの速度と傾斜を増加させたランプ負荷からその仕事量（Watt）を推定し、自転車エルゴメータで同仕事量が得られた際の呼気ガス諸指標と比較することによって開発したプロトコルの有効性を示したが、これは対象者の $\dot{V}O_{2max}$ が $40 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ を下回る運動習慣のない一般人のものである。高橋ら（2008）も 20 秒毎に負荷を増加させるランプ負荷プロトコルを作成したが、その際に用いた被験者（運動歴のある健常若年男性）の $\dot{V}O_{2max}$ は $53.3 \pm 4.8 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であり、これは日本人の体力基準（鈴木ら, 2009）からすると年齢相応の体力となる。さらに、Silva et al. (2018) の対象も一般成人男女であり、このプロトコルによって得られた $\dot{V}O_{2max}$ は $42 \sim 43 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 程度のものではあった。一方、熊本と佐川（2006）の対象はエリ

ートランナーであるが、そのプロトコルは本研究のものとは大きく異なっている。この研究では、 $\dot{V}O_{2\max}$ や VT、RCP とともに RE も同時に測定するため、ランプ負荷開始後 6 分 40 秒まで傾斜をつけず速度のみを漸増させており、特殊なケースと言えるだろう。さらに、傾斜をつけずに被験者の最大努力付近まで負荷を高めた場合、高速走行に伴う転倒の危険性が増すなど、安全性での問題が生じてくる。したがって、本研究で設定した、負荷開始時から速度と傾斜を増加させることにより被験者の安全性を確保した上で、 $\dot{V}O_2$ 増加の直線性が確保できた本研究のプロトコルは、他施設においても、高度な全身持久力を有する被験者を測定する際に、より実用的なものとして勧められるものとなるだろう。

しかし、本研究において、得られた $\dot{V}O_2$ の予測値と実測値の間には大きな差異が認められた。図 4 に示したように、ランプ負荷開始 1 分後を運動開始時点とし、運動終了直前までの区間を直線回帰したところ、予測値の回帰式が、 $\dot{V}O_2 = 6.00t - 3.00$ であったのに対し、実測値は、 $\dot{V}O_2 = 5.58t + 9.64$ (ともに t は時間 [分]) となった。また、ウォーミングアップ中の $\dot{V}O_2$ も予測値が $15 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ であったのに対して、 $29.0 \pm 3.3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ とかなり高値を示した。これは、運動様式の違いによる影響が出たものと考えられる。今回作成したプロトコルは山本 (1993) の推定式を利用したが、これはできる限り歩行運動が遂行できるように作成されている。歩行と走行は類似した運動形態ではあるが身体への負荷が異なり、運動効率の影響から $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ を下回る速度では走行時の $\dot{V}O_2$ は歩行時のものよりも高値を示すことが知られている (Falls & Humphrey, 1976; Walker et al., 1999)。さらに、鍛錬されたエリート駅伝選手の場合、高速走行時における RE が優れ、 $\dot{V}O_2$ が低値を示したことも考えられ、これらの理由から単回帰係数が推定値に対して低値を示す結果になったのかもしれない。

そこで、アメリカスポーツ医学会 (American College of Sports Medicine: ACSM) が示している運動形態別推定エネルギー消費量の推定式 (ACSM,

2018)に今回設定した速度と傾斜を当てはめた式を加え、検討を行った(図5)。ACSMでは、歩行あるいは走行時のエネルギー消費量を速度と傾斜から推定する方法を以下のように示しており、この予測式の妥当性に関してはポジティブな評価が得られている(Hall et al., 2004; Marsh, 2012)。

$$\text{歩行運動: } \dot{V}O_2 \text{ (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = 3.50 + 0.1S + 1.8SG$$

$$\text{走行運動: } \dot{V}O_2 \text{ (mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = 3.50 + 0.2S + 0.9SG$$

(ともに、Sは速度 [m・min⁻¹]、Gは傾斜 [%])

その結果、本研究で得られた $\dot{V}O_2$ の実測値はACSM(2018)が示す走行運動の予測式から算出された予測値と非常に強い相関を示す($r = 0.996$, $r < 0.001$)ことがわかった。本研究では、ウォーミングアップ時の走速度を7.1km・h⁻¹(傾斜は0%)とし、疲労困憊まで速度を増加させている。ACSM(2018)の示す走行運動の推定式が8.0 km・h⁻¹以上の速さ対してかなり適合し、ジョギング運動であれば、4.8 km・h⁻¹以上の速度にも対応している点を考慮すると、今回の結果は運動時の $\dot{V}O_2$ が歩行、走行といった運動形態の影響を強く受けたことを示唆するものである。これまで国内で報告されてきた負荷量を直線的に増加させるトレッドミル負荷法は、歩行運動を意識した山本(1993)の予測式をもとに研究が進められてきた。しかし、全身持久力が高い者を対象に走行運動を課す場合、この式は十分に適用しない可能性が示唆されたことから、今後も、走運動により $\dot{V}O_{2\max}$ 、VT、RCPが測定できる運動鍛錬者用トレッドミルプロトコルの研究が必要になるだろう。

5. まとめ

本研究は、トレッドミルを用いて負荷変動量を少なくしたエリート駅伝選手用GXTプロトコルを開発し、その精度を検証することとした。漸増運動中に得られた全ての被験者の $\dot{V}O_2$ は有意な直線回帰が認められ、直線的に負荷量を増加させることができた。また、想定された運動終了時間に $\dot{V}O_{2\max}$ を得ることができた。さらに、GXT実施時に得られた呼気ガス

諸指標の変化から VT や RCP といった代謝性閾値の判定も容易に行うことができた。以上から、今回開発したエリート駅伝選手用 GXT プロトコルの有効性が示唆された。

参考文献

- American College of Sports Medicine: Guidelines for exercise testing and prescription, 10th Ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, pp.152, 2018.
- Beaver WL., K. Wassermann, BJ. Whipp: A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange, *J. Appl. Physiol.*, 60: 2020-2027, 1986.
- Beltz, NM., AL. Gibson, JM. Janot, L. Ktavitz, CM. Mermier, LC. Dalleck: Graded exercise testing protocols for the determination of $\dot{V}O_{2max}$; Historical perspectives, progress, and future considerations, *J. Sports Med.*, 2016. doi: 10.1155/2016/3968393.
- Buchfuhrer MJ., JE. Hansen, TE. Robinson, DY. Due, K. Wasserman, BJ. Whipp: Optimizing the exercise protocol for cardiopulmonary assessment, *J. Appl. Physiol.*, 55: 1558-1564, 1983.
- Conley, DL., GS. Krahenbuhl: Running economy and distance running performance of highly trained athletes, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 12: 357-360, 1980.
- Daniels, J.: A physiologist's view of running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17: 332-338, 1985.
- Davis JA.: Anaerobic threshold: Review of the concept and directions for future research, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17: 6-18, 1985.
- Falls HB., and LD. Humphrey: Energy cost of running and walking in young women, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 8: 9-13, 1976.
- Hall C., A. Figueroa, BO. Fernhall, JA. Kanaley: Energy expenditure of walking and running: Comparison with prediction equations, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36: 2128-2134, 2004.
- International Association of Athletics Federations: Competition Rules 2018-2019, in force from 1 November 2017, <https://www.iaaf.org/about-iaaf/documents/rules-regulations#rules>, 2019/03/07 アクセス
- Itoh, H., R. Ajisaka, A. Koike, S. Makita, K. Omiya, Y. Kato, H. Adachi, M. Nagayama, T. Maeda, A. Tajima, N. Harada, K. Taniguchi, On behalf of the Committee on exercise prescription for patients (CEPP) members: Heart rate and blood pressure response to ramp exercise and exercise capacity in

- relation to age, gender, and mode of exercise in a healthy population, *J. Cardiol.*, 61: 71-78, 2013.
- Jacobs, I., B. Sjodin: Relationship of ergometer-specific $\dot{V}O_{2max}$ and muscle enzymes to blood lactate threshold, *Br. J. Sports Med.*, 19: 77-80, 1985.
- Kumagai, S., K. Tanaka, Y. Matsuura, A. Matsuzaka, K. Hirakoba, K. Asano: Relationships of the anaerobic threshold with the 5 km, 10 km, and 10 mile-races, *Eur. J. Appl. Physiol.*, 49: 13-23, 1982.
- 熊本和正, 佐川和則: エリートランナーの全身持久力を測定するためのトレッドミルを用いた ramp 負荷プロトコル, 近畿大学健康スポーツ教育センター紀要, 5: 67-75, 2006.
- Larsen, HB., AW. Sheel: The Kenyan runners, *Scand. J. Med. Sports*, 25: 110-118, 1985.
- Marsh, CE.: Evaluation on the American College of Sports Medicine submaximal treadmill running test for predicting $\dot{V}O_{2max}$, 26: 548-554, 2012.
- Myers, J. N. Buchanan, D. Walsh, M. Kraemer, P. McAuley, M. Hamilton-Wessler, VF. Froelicher: Comparison of the ramp versus standard exercise protocols, *J. Amer. College Cardiol.*, 17:13334-1342, 1991.
- 日本陸上競技連盟: 駅伝競走規準 (2015 年 3 月修改正)、<http://www.jaaf.or.jp/athlete/rule/pdf/21.pdf>, 2019/3/7 アクセス
- Porszasz, J., R. Casaburi, A. Somfay, LJ. Woodhouse, BJ. Whipp: A treadmill ramp protocol using simultaneous changes in speed and grade, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35: 1596-1603, 2003.
- Silva, SC. WD. Monteiro, FA. Cunha, P. Farinatti: Influence of different treadmill inclinations on $\dot{V}O_{2max}$ and ventilatory thresholds during maximal ramp protocols, *J. Strength Cond. Res.*, 2018. doi: 10.1519/JSC.0000000000002670.
- 志野友義, 都築実紀, 近藤照夫, 外畑巖: 临床上使用される treadmill 運動負荷試験における酸素摂取量の予測, 名古屋大学医学会誌, 105: 69-77, 1983.
- Sperlich, PF., HC. Holmberg, JL. Reed, C. Zinner, J. Mester, B. Sperlich: Individual versus standardized protocols in the determination of $\dot{V}O_{2max}$, *J. Sports Sci. Med.*, 14: 386-393, 2015.
- 鈴木政登, 田中喜代次, 須藤美智子, 澤田享, 小田切優子: 日本人の健康関連体力指標最大酸素摂取量の基準値, デサントスポーツ科学, 30: 3-14, 2009.
- 高橋一輝, 鈴木誠, 小野部純, 吉田忠義, 藤澤宏幸: トレッドミルを用いた直線的漸増負荷試験における新しいプロトコルの検討, 東北文化学園大学リハビリテーション学科紀要, 4: 29-37, 2008.

- Taylor, HL., E. Buskirk, A. Henschel: Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance, J. Appl. Physiol., 8: 73-80, 1955.
- Walker JL., TD. Murray, AS. Jackson, JR. James, TJ. Michaud: The energy cost of horizontal walking and running in adolescents, Med. Sci. Sports Exerc., 31: 311-322, 1999.
- Whipp, BJ., JA. Davis, F. Torres, K. Wasserman: A test to determine parameters of anaerobic function during exercise; J. Appl. Physiol., 50: 217-221, 1981.
- 山地啓司：ランニングの経済性に影響を及ぼす要因，日本運動生理学雑誌，4：81-98, 1997.
- 山地啓司：最大酸素摂取量の科学，杏林書院，東京，pp.56-101. 2001.
- 山本雅庸：トレッドミル ramp 負荷のための酸素摂取量予測式と臨床応用，日本臨床生理学会雑誌，23：17-29, 1993.
- Yoon, BK., L. Kravitz, R. Robergs: $\dot{V}O_{2max}$, protocol duration, and the $\dot{V}O_2$ Plateau, Med. Sci. Sports Exerc., 39: 1186-1192, 2007.